

Multikritériumos értékelő módszer hibrid meghajtású vasúti járművek üzemeltetéséhez

Fetter Marcell¹ – Dr. Csonka Bálint²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)
Közlekedésmérnök és Járműmérnöki Kar (KJK)
Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszák (KUKG)
telefon: +36 70 5538355
e-mail: marcell.fetter@edu.bme.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME)
Közlekedésmérnök és Járműmérnöki Kar (KJK)
Közlekedésüzemi és Közlekedésgazdasági Tanszák (KUKG)
telefon: +36 20 4464682
e-mail: csonka.balint@kjk.bme.hu

Kivonat: Napjainkban egyre több hibrid-akkumulátoros meghajtású vasúti járművet helyeznek forgalomba. Az üzemeltetési jellemzői ezeknek a járműveknek nagyban eltér a hagyományos dízel és villany meghajtásúakétól, ami kihívást jelent az azokat üzemeltető vasútvállalatok számára. Ezért kidolgoztunk egy multikritériumos értékelő módszert, ami segítséget nyújt a hibrid járművek paramétereinek harmonizálásában, illetve az új típusú járművek jellemzői alapján lehetőség nyílik a vasútvonalak értékelésére is. Megállapítottuk, hogy a nem villamosított szakaszok hossza, az akkumulátor kapacitása, a vasúti pálya állapota, az üzemeltetett motorvonatok száma és az utasforgalom nagysága a legfontosabb tényezők a hibrid motorvonatok üzemeltethetősége szempontjából. Az értékelő módszert több vasútvonalra alkalmaztuk, ami alapján megállapítottuk, hogy elektromos töltőállomás kiépítése nélkül azon vasútvonalakon célszerű a hibrid, villamos-akkumulátoros motorvonatok közlekedtetése, melyek 40-60%-ban villamosítottak.

Kulcsszavak: hibrid, akkumulátor, értékelő módszer, motorvonat, vasút, üzemeltetés

Bevezetés

Annak ellenére, hogy a szárazföldi közlekedésben magas részaránya van a személygépkocsi használatnak, a vasút meghatározó szerepet tölt be a személyközlekedésben évtizedek óta. A vasúti személyszállítás teljesítménye évente átlagosan 2%-kal nőtt 2013 és 2019 között, és majdnem eléri a 415 milliárd utaskilométert az Európai Unióban [1]. Napjainkban, a környezetvédelemnek egyre fontosabb hatása van a közlekedésszervezésre is. A vasúti közlekedés utaskilométerenkénti szén-dioxid kibocsátása jelentősen alacsonyabb, mint a személygépkocsi használaté ([2], [3]), és tovább csökkenthető a villamos hajtás részarányának a fokozásával. Az elektromos energia előállításának károsanyag kibocsátását alapul véve, megállapítható, hogy a villamos vontatás szén-dioxid kibocsátása 15-45%-kal alacsonyabb lehet a dízel vontatáshoz képest [4]. A vasúti fővonalakat tekintve az európai vasúthálózat 60%-a villamosított, melyen az összforgalom 80%-a bonyolódik le [2]. Az európai vasúthálózat további villamosításának nincsenek technológiai akadályai, azonban sok esetben, a kevésbé forgalmas vonalakon nem gazdaságos a felsővezeték hálózat kiépítése. Ezért, a dízel vontatás aránya a mai napig jelentős, azonban számos hátránya van a villamos meghajtáshoz képest:

- magasabb lokális károsanyag kibocsátás,
- magasabb üzemeltetési költségek,
- rövidebb jármű élettartam [4].

Léteznek alternatív üzemanyagok, mint például a biodízel, a metanol, vagy hidrogén, azonban ezen üzemanyagok használatának aránya nem valószínű, hogy meg fogja haladni a 10%-ot 2040-ig [5]. Ezt leszámítva a zöld közlekedési módok kedvező hatással lehetnek a szolgáltatások minőségére is [6]. Ebből kifolyólag megjelentek olyan hibrid, akkumulátoros villamos motorvonatok, melyek a nem villamosított vasútvonalakon a fedélzetükön lévő akkumulátorokban tárolt energia segítségével tudnak közlekedni, a villamosított szakaszokon pedig a felsővezeték rendszer használatával. Ezen járművek különböző

üzemeltetési jellemzőkkel bírnak, alkalmazásukat pedig eseti alapon értékeli, mivel nincs olyan általános módszer, amely támogatná az üzembe helyezésüket és üzemeltetésüket.

Ebből kifolyólag, a cikkben egy súlyozott multikritériumos értékelő módszert dolgoztunk ki a döntéshozók támogatásának érdekében. A módszer a vasútvonalak és motorvonatok értékelésére lett kifejlesztve, a hibrid, akkumulátoros vasúti járművek alkalmazhatósága alapján.

A cikk felépítése a következő: A vonatkozó szakirodalom 1. fejezetben történő rövid áttekintése után, a 2. fejezetben a hibrid meghajtású motorvonatok összehasonlítására kerül sor, amit a 3. multikritériumos értékelő módszer követ. A 4. illetve 5. fejezetben a módszer alkalmazhatóságát bemutató esettanulmány és a kutatás eredményei találhatóak. A cikk végén ismertetjük a jövőbeni kutatási célokat.

1. Irodalomkutatás

Az elmúlt években számos tanulmány foglalkozott az akkumulátoros elektromos járművekkel. A vizsgálat kiterjedt az akkumulátor technológiákra, energia menedzsmentre, környezetterhelésre, töltőinfrastruktúrára, újszerű közlekedési módokra és a hálózat modellezésére (pl.: [7]-[11]). Ehhez képest kevés cikk foglalkozik az akkumulátoros villamos vontatás és motorvonatok üzemeltetésével.

A közúti közlekedéshez hasonlóan a vasúti közlekedésben is léteznek hibrid megoldások, ahol a hagyományos és villamos hajtást egyesítik az energiahatékonyság növelése érdekében. Ehhez fedélzeti energiatárolók alkalmazása szükséges, melyek közül a lítium-ion akkumulátorok és a kondenzátorok a leginkább alkalmasak [12]. Szintén a lítium-ion akkumulátort találták a leginkább megfelelőnek a [13] tanulmányban, ahol az akkumulátorok alkalmazhatóságát vizsgálták tolatómozdonyokban a felhasználási jellemzők és terhelés függvényében. Továbbá megállapították, hogy a hibrid hajtásnak köszönhetően az energiafogyasztás és károsanyag kibocsátás akár 35%-kal is csökkenthető. Dízel-elektromos meghajtású vontatómozdonyokat alkalmaztak hegyi szakaszokon a [14] tanulmányban. A vizsgálat eredménye, hogy a jelentősen alacsonyabb energiaköltség kompenzálhatja a hibrid hajtás költségét.

A hidrogén üzemanyagcellás mozdonyokhoz készítettek energia menedzsment alkalmazást a [15] és [16] tanulmányban. Megállapították, hogy az energiafelhasználás optimalizálásával jelentősen csökkenthető a teljes energiafogyasztás. A fedélzeti akkumulátoros energiatárolás és üzemanyagcella kapacitását optimalizáló eljárást fejlesztettek a [17] cikkben. Az optimalizálás célja a hibrid meghajtás teljes költségének a minimalizálása volt adott felhasználási körülmények között. A vasúti közlekedés károsanyagkibocsátására helyezték a hangsúlyt a [18] dolgozatban. A hidrogén üzemanyagcellás jármű üzemeltetésének optimalizálásakor figyelembe vették az energiamixet is. Megállapították, hogy az energia és közlekedési szektor összekapcsolása kedvező hatással lehet mindkét félre.

Numerikus modellezést alkalmaztak a [19] tanulmányban, hogy megállapítsák a hidrogén töltőinfrastruktúra optimális kapacitását és a motorvonatok optimális számát. A vizsgálat eredménye, hogy a hidrogén üzemanyagcella fenntartható alternatívája a hagyományos dízel vontatásnak.

Az akkumulátoros villamos mozdonyok és motorvonatok alkalmazásával kevés cikk foglalkozott. Az akkumulátoros villamos meghajtás elsősorban a rövid és kisforgalmú vonalakon helyettesítheti a hagyományos dízel vontatást [20]. Így a károsanyag kibocsátás és az üzemeltetési költség jelentősen csökkenthető. A fedélzeti akkumulátoros energiatárolók, és a rövid, szakaszos felsővezeték-hálózat kombinációját vizsgálták a [21] tanulmányban. Mivel a motorvonatok energiafogyasztása az induláskor jelentős, ezért a gyorsítást támogató felsővezeték hálózat kiépítésével jelentősen csökkenthető a motorvonatok akkumulátor kapacitása. Hidrogén üzemanyagcellás hajtást vizsgálták személy- és áruszállításban, eltérő energiaigények esetén a [22] tanulmányban. Bár az energiafogyasztás széles skálán mozgott, a hajtásrendszer hatásfoka közel azonos volt minden esetben.

Az akkumulátoros villamos motorvonatok üzemeltetését vizsgálták Németországban a Kiel-Rendsburg-Jübek-Husum [23], és Japánban a Hōshakuji-Karasuyama vasútvonalon [24]. A példák alapján megállapítottuk, hogy:

- a nem villamosított pályaszakasz hossza 20 és 30 km között van, illetve
- az akkumulátor kapacitásnak kevesebb, mint 50%-át használják a járművek.

Megfigyelhető, hogy elővigyázatosságból a vasútvonal mentén több töltőberendezést is telepítettek.

Az irodalomkutatás alapján megállapítottuk, hogy számos cikk foglalkozik a hibrid hajtásrendszerek vasúti alkalmazásával. Ugyanakkor ezen tanulmányok jelentős része a hidrogén tüzelőanyagcellás technológiára, az energiamenedzsmentre és a környezetterhelésre fókuszál. Az akkumulátoros villamos motorvonatok üzemeltethetőségét kevés tanulmányban vizsgálták, és hiányzik az üzemeltetési szempontok széleskörű elemzése, amit kutatási hézagként azonosítottunk. Erre a problémára jelent megoldást az üzemeltetési szempontokat széleskörűen lefedő döntéstámogató multikritériumos elemzés.

2. Hibrid motorvonatok áttekintése

Az értékelő módszer kidolgozása előtt elemeztük a villamos-akkumulátoros motorvonatok tulajdonságait annak érdekében, hogy feltárjuk ezen paramétereknek a működésre és az utasok kényelmére gyakorolt hatásait. Négy villamos-akkumulátoros motorvonatot vizsgáltunk meg, melyek a következők: Siemens Mireo Plus B, Bombardier Talent 3, Stadler Flirt Akku és Alstom Coradia Continental motorvonatok. Ez a négy motorvonat típus lefedi a hibrid-elektromos motorvonat piac jelentős részét, továbbá számos európai vasúttársaság rendelt nagy mennyiségben ezen járműtípusok valamelyikéből.

A vizsgált járműtípusok jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat: Összehasonlított villamos-akkumulátoros motorvonat típusok

| Járműtípus | Hatótáv [km] (R) | Férőhely (C) | Max. sebesség [km/h] |
|---------------------------------|---------------------|-----------------|-------------------------|
| Alstom Coradia Continental [25] | 120 | 150 | 160 |
| Bombardier Talent 3 [26] | 100 | 169 | 140 |
| Siemens Mireo Plus B [27] | 80 | 120 | 140 |
| Stadler Flirt Akku [28] | 150 | 154 | 140 |

Mindegyik villamos-akkumulátoros meghajtású motorvonat akkumulátorai állóhelyzetben és menetközben is tölthetők felsővezetékéről. A járművek állóhelyzetben speciális elektromos töltőpontokról is tölthetők, vezetékes összeköttetés segítségével. A járművek akkumulátorainak töltési ideje nagyjából 10-15 percet vesz igénybe [29].

Mivel a hibrid járművek egy töltésből adódó hatótávolsága jóval alacsonyabb, mint a dízel meghajtású motorvonatoké, ezért ezen járműveket gyakrabban kell tölteni. Ennek megfelelően, a töltés tervezése kiemelten fontos az üzemeltetés során. A cél olyan helyszínek azonosítása, ahol a villamos-akkumulátoros motorvonatokat idővesztés nélkül lehet feltölteni. Ennek érdekében érdemes olyan állomásokon statikus töltőpontok létesítése, ahol a járművek akkumulátorai feltölthetők az utascsere ideje alatt [30].

3. Értékelő módszer

Kidolgoztunk egy súlyozott multikritériumos értékelő módszert a villamos-akkumulátoros motorvonatok számára annak érdekében, hogy meghatározható legyen, mely vasútvonalakon célszerű az üzemeltetésük, a jármű, a vasútvonal, illetve az utasforgalmi jellemzők alapján. Az értékelés szempontjai a következők:

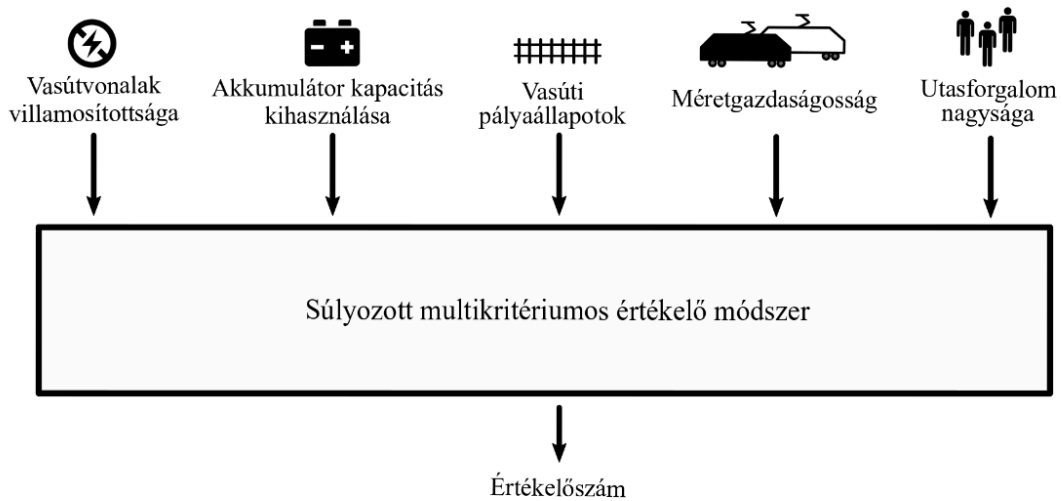
- vasútvonalak villamosítottasága,
- akkumulátor kapacitás kihasználása,
- vasúti pályaállapotok,
- méretgazdaságosság,
- utasforgalom nagysága.

Az egyes szempontokat 1-től 5-ig terjedő skálán értékeltük. Az 1 pont jelentése, hogy az adott vasútvonalon egyáltalán nem érdemes az alkalmazásuk, míg az 5 pont jelentése, hogy az adott vonalon célszerű a hibrid meghajtású járművek közlekedtetése. Az egyes szempontok értékelőszámának súlyozott átlaga a vasútvonal értékelőszáma. A vasútvonalak értékelőszáma alapján:

- a vasútvonalak rangsorolhatók, hogy hol érdemes előbb áttérni hibrid meghajtású motorvonatokra,

- értékelhető a töltési infrastruktúra fejlesztésének hatása a villamos-akkumulátoros járművek alkalmazására, valamint
- támogatja a megfelelő motorvonat típus kiválasztását.

Az értékelés menetét a 1. ábra foglalja össze.



1. ábra: Az értékelés menete

Az értékelés szempontjainak részletes ismertetése a következő alfejezetek tartalmazzák.

3.1 Vasútvonalak villamosítotttsága

A szempont értékelésénél 5 kategóriát határoztunk meg az útvonal leghosszabb nem villamosított szakaszának (L_{NV}) és a motorvonat hatótávolságának (R) aránya alapján. A meghatározott kategóriák a létező, reális vasútvonal és viszonylat kialakításokat szinte teljes mértékben lefedik, azonban előfordulhat olyan eset, amely külön vizsgálatra szorul.

A kategóriákhoz értékelőszámot rendeltünk 1-től 5-ig. Ezen szempont alapján azt vizsgáljuk, hogy a motorvonat akkumulátoros üzeme esetén a vizsgált útvonalon milyen távolságban tud elközeledni közbenső vagy végponti töltés nélkül. A hatótávolság a hibrid meghajtású, akkumulátoros motorvonatok üzemeltetése kapcsán kulcskérdés, hiszen üzemzavart okozhat, ha útközben lemerülnek, jelentős többletköltséget jelenthet a töltőpontok kiépítése, valamint menetidő növekedést is okozhat a töltési idő [20].

A szempont kategóriáit a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat: Vasútvonalak villamosítotttságának kategóriái

| Pontszám (p_1) | Kategória leírása |
|--------------------|---|
| 1p | $H/L_{NV} \leq 1$ |
| 2p | $1 < H/L_{NV} \leq 2$, továbbá a nem villamosított vasútvonal csak egyik végpontján csatlakozik felsővezetékkel ellátott vonalszakaszhoz |
| 3p | $1 < H/L_{NV} \leq 2$, továbbá a nem villamosított vasútvonal mindkét végpontján van meglévő töltési lehetőség |
| 4p | $H/L_{NV} > 2$, továbbá a nem villamosított vasútvonal legalább egyik végpontján csatlakozik felsővezetékkel ellátott vonalszakaszhoz |
| 5p | $H/L_{NV} > 2$, továbbá a vonat a teljes útvonalon legalább 15 percig felsővezetékkel ellátott pályaszakaszon halad |

3.2 Akkumulátor kapacitás kihasználása

Az akkumulátorok kapacitása a töltés-kisütés ciklusok hatására fokozatosan csökken, és egy bizonyos mértékű kapacitáscsökkenés után újakat szükséges beszerezni. Az akkumulátorok napjainkban még elég költségesek, ezért mind gazdaságossági, mind pedig üzemeltetési szempontból fontos, hogy a járművek ezen alkatrészei minél kisebb mértékben veszítsenek kapacitásukból és minél ritkábban legyen szükség a cseréjükre.

Akkumulátorokkal kapcsolatos kutatások kimutatták, hogy a kapacitás csökkenésének mértéke összhangban van azzal, hogy milyen töltöttségi intervallumon működnek, illetve milyen töltöttségi szint után kerülnek feltöltésre [31]. Mivel a vasúti járművek hosszú élettartammal rendelkeznek (kb. 30 év) és az akkumulátorok kapacitásromlása a 20%-ot is elérheti 1000 töltés-kisütés ciklus után [32], ezért célszerű az olyan kapacitáskihasználási intervallumban üzemeltetni, amely csökkenti az akkumulátorok cseréjének költségeit. Ennek megfelelően, megállapítottuk a kapacitáskihasználási intervallumok kategóriáit. A legmagasabb pontszámot ahhoz a kategóriához rendeltük, ahol a jármű akkumulátora a kapacitás hosszú távú megőrzése szempontjából a legelőnyösebben használható [33].

A cikkben a jármű akkumulátor töltöttségét egyenesen arányosnak tekintjük a jármű hatótávolságával, ezért a jármű akkumulátorának kihasználtságát a következőképpen lehet megállapítani:

$$A = \frac{L_{NE}}{R} \quad (1)$$

Habár mind a vasútvonalak villamosíthatósága, mind az akkumulátor kapacitás kihasználása szempontok értékei az L_{NE} és az R függvényei, más hatással vannak a hibrid járművek üzemeltetésére. Míg a vasútvonal villamosíthatósága főként a töltési infrastruktúra költségeivel van összefüggésben, addig az akkumulátor kapacitásának kihasználtsága az akkumulátorok beszerzési árához és cseréjükhöz kapcsolódik szorosabban. Éppen ezért ezen paramétereket külön kategóriákban értékeljük. Az akkumulátor kapacitás kihasználásának kategóriáit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Akkumulátor kapacitás kihasználásának kategóriái

| Pontszám (p_2) | Kategória leírása |
|--------------------|---|
| 1 | $A < 0,04$ vagy $0,8 \leq A$ |
| 2 | $0,04 \leq A < 0,045$ vagy $0,6 \leq A < 0,8$ |
| 3 | $0,045 \leq A < 0,05$ vagy $0,4 \leq A < 0,6$ |
| 4 | $0,05 \leq A < 0,06$ vagy $0,2 \leq A < 0,4$ |
| 5 | $0,06 \leq A < 0,2$ |

Az akkumulátor élettartamától eltekintve, ha az A értéke kisebb, mint 0,05 az azért sem kedvező, mert ebben az esetben a motorvonat szinte egész útja során felsővezetékkel ellátott vasútvonalon közlekedne. Ebben az esetben érdemes megvizsgálni, hogy gazdaságilag kedvezőbb-e ezt a rövid szakaszt villamosítani és tisztán villamos meghajtású motorvonatokat üzemeltetni, melyek beszerzési ára és fenntartási költsége jóval kisebb, mint a villamos-akkumulátoros meghajtású járművéké.

3.3 Vasúti pályaállapotok

A rossz minőségű vasúti pálya jelentősen csökkentheti a jármű rendelkezésre állását, ami megnöveli a megtérülési időt. Ezért célszerű a jó állapotú pályaszakaszokon helyettesíteni a hagyományos dízel motorvonatokat villamos-akkumulátoros motorvonatokkal. A pontos pályaállapotokra vonatkozóan nem állt rendelkezésre adat. Azonban a vasútvonalakon engedélyezett pályasebességekből következtetni lehet az adott vasútvonal állapotára. Így ezen szempont pontszámait az értékelendő vasútvonalon engedélyezett maximális sebességek súlyozott átlaga alapján határoztuk meg. Az átlagsebesség távolság szerinti súlyozását a (2) képlet írja le.

$$v_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{max_i} \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (2)$$

Ahol:

- v_{avg} a teljes viszonylat távolság szerint súlyozott maximális megengedett átlagsebessége,
 $v_{max,i}$ egy adott szakasz maximális engedélyezett sebessége,
 L_i egy adott szakasz hossza,
 n szakaszok száma.

Az értékelés során azt a célsebességet, amellyel az értékelt járművet üzemeltetni tervezik, V -vel jelöltük. A V értékét az értékelés előtt szükséges meghatározni. A vasúti pályaállapotok szempont kategóriáit a v_{avg} és a V értékei alapján határoztuk meg, melyet a 4. táblázat tartalmaz.

4. táblázat: Vasúti pályaállapotok szempont kategóriái

| Pontszám (p_3) | Kategória leírása |
|--------------------|--|
| 1 | $v_{avg} \leq V/2$ km/h; a vasúti pálya jelentős felújítására van szükség. |
| 3 | $V/2 < v_{avg} < V$ km/h; a vasúti pálya kisebb mértékű felújítására van szükség. |
| 5 | $V \leq v_{avg}$ km/h; a vasúti pálya állapota megfelelő, felújításra nincs szükség. |

3.4 Méretgazdaságosság

Több, azonos típusú jármű üzemeltetése jelentősen csökkenti a karbantartási költségeket, illetve egyszerűsíti az ezzel kapcsolatos feladatokat. Az értékelő módszerben ezért bevezettük a méretgazdaságosság szempont.

Egy karbantartó helyszín megépítésének megtérülése sok különböző tényezőtől függhet, ezért további, szélesebb körű gazdasági számításokra lehet szükség az optimális üzemeltetett járműszám meghatározásához. Az értékelő módszerben M változó az optimális járműszámot jelenti, míg az NV az értékelt vasútvonalon tervezetten üzemeltetett járművek darabszámát jelöli.

A kategória szempontjait az 5. táblázat foglalja össze.

5. táblázat: Méretgazdaságosság szempont kategóriái

| Pontszám (p_4) | Kategória leírása |
|--------------------|-------------------|
| 1 | $NV \leq 0,3M$ |
| 3 | $0,3M < NV < M$ |
| 5 | $M \leq NV$ |

3.5 Utasforgalom nagysága

Az utasforgalom nagysága kategóriában a vonatonkénti átlagos utasszám (\bar{u}) és a motorvonatok maximális férőhelykapacitása (C) kerülnek kiértékelésre.

Az átlagos utasszám meghatározása az alábbi képlet szerint történik:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \cdot L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (3)$$

Ahol:

- \bar{u} a teljes viszonylat vonatonkénti átlagos utasszáma,
 u_i a viszonylat i -edik állomásközének vonatonkénti átlagos utasszáma,
 L_i az i -edik állomásköz hossza,
 n az állomásközök száma.

Az utazóközönség kényelmét, valamint a kapacitáskihasználást figyelembe véve, az ideális utasszám a vasúti jármű maximális férőhelykapacitásának (C) a 70-80%-a vagy több mint 130%-a. A 130%-nál magasabb kihasználtság azért kedvező, mert ebben az esetben 2 összekapcsolt motorvonat kihasználtsága is elfogadható mértékű. Abban az esetben, ha az utasok száma nem éri el a motorvonat férőhelykapacitásának 70%-át, célszerű egy kisebb befogadóképességű jármű beszerzése. A 80% és 100% közötti utasszám zsúfoltságot eredményez, ami hátrányosan befolyásolja az utasok kényelemérzetét. A 100% és 130% közötti kihasználtsági érték pedig azért nem kedvező, mert ebben az esetben 2 összekapcsolt motorvonat közlekedtetése szükséges, azonban a második egység kihasználtsága alacsony lenne. Az ütemes menetrend miatt a menetrendsűrités nem megoldás a 100-130%-os kihasználtságra. Hiszen a követési időt az ütemesség miatt legkisebb mértékben is csak felére lehetne csökkenteni, ami ebben az esetben túlságosan nagy, kétszeres kapacitásnövelést eredményezne.

Ezen szempont kategóriáit a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat: Utasforgalom nagysága szempont kategóriái

| Pontszám (p_5) | Kategória leírása |
|--------------------|---|
| 1 | $\bar{u} \leq 0,2C$ |
| 2 | $0,2C < \bar{u} \leq 0,3C$ vagy $C < \bar{u} \leq 1,3C$ |
| 3 | $0,3C < \bar{u} \leq 0,5C$ |
| 4 | $0,5C < \bar{u} \leq 0,7C$ vagy $0,8C < \bar{u} \leq C$ |
| 5 | $0,7C < \bar{u} \leq 0,8C$ vagy $1,3C < \bar{u}$ |

4. Szempontok súlyának meghatározása

Az értékelésbe bevont szempontok fontosságát számos tényező befolyásolhatja, amit a súlyszámok (s_i) fejeznek ki. Minden vizsgálat megkezdése előtt meg kell állapítani, hogy mi az általános cél az értékelés során. Ha például az a legfontosabb célkitűzés, hogy a villamos-akkumulátoros meghajtású motorvonatok utaskihasználtsága magas legyen, akkor az utasforgalom nagysága szemponthoz kell a legnagyobb súlyszámot rendelni. Ha a járművek javítási és szervízköltségének csökkentése a cél, akkor a vasúti pályaaállapotokat, az akkumulátor kapacitás kihasználtságot és a méretgazdaságosság szempontokat kell nagyobb súllyal figyelembe venni. A súlyszámoknak a következő feltételeket kell teljesíteniük:

$$\forall s_i \geq 0 \quad (4)$$

$$\sum s_i = 1 \quad (5)$$

Az egyes viszonylat és járműkombinációkra kapott végső pontszám súlyozott átlagszámítással kapható meg az alábbi képlet szerint:

$$P = \sum_{i=1}^5 s_i \cdot p_i \quad (6)$$

Ahol:

- P a végső pontszám
 s_i az i -edik szempont súlyszáma
 p_i az i -edik szempontra adott értékelő pontszám.

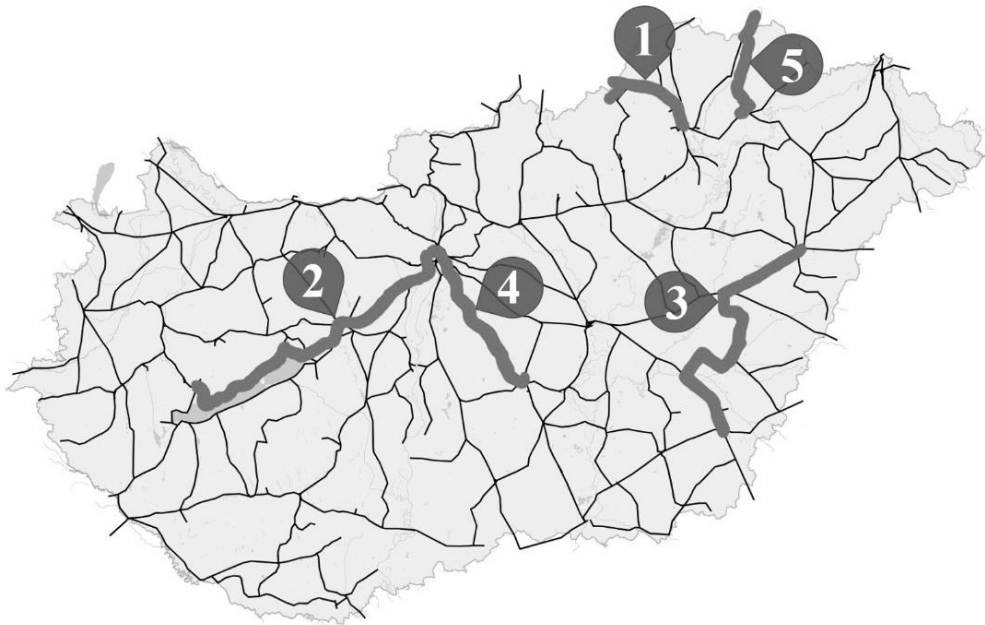
5. Esettanulmány

Az értékelő módszert Magyarország különböző vasútvonalainak vizsgálatára alkalmaztuk az 1. táblázatban feltüntetett motorvonat típusokkal. Az értékelt vasútvonalak a következők:

1. Miskolc-Kazincbarcika-Ózd vasútvonal, amely Miskolc megyeszékhely elővárosában található,
2. Budapest-Székesfehérvár-Tapolca vasútvonal, amely egy belföldi távolsági viszonylat,

3. Debrecen-Püspökladány-Szeghalom-Gyoma-Békéscsaba viszonylat, amely belföldi regionális közlekedésre példa,
4. Budapest-Lajosmizse-Kecskemét vasútvonal, amely Budapest elővárosi közlekedésének része,
5. Miskolc-Szerencs-Abaújszántó-Hidasnémeti-Kassa viszonylat, amely kishatárforgalmi közlekedésre példa.

A vizsgált vasútvonalakat a 2. ábrán tüntettük fel.



2. ábra: Az esettanulmányban értékelt vasútvonalak térképe

Az értékelésbe bevont járművek paramétereit az 1. táblázat tartalmazza. Az esettanulmányban M változó értékét 20 db járműben, V értékét pedig 80 km/h-ban határoztuk meg. M változó értékét a MÁV-START Zrt. személykocsi állományának tanulmányozásával, illetve egy honállomáshoz tartozó járműtípusok száma alapján állapítottuk meg.

Az esettanulmányban értékelt vasútvonalak paramétereit a 7. táblázat foglalja össze.

7. táblázat: Vizsgálatba bevont vasútvonalak paramétereit

| Vasútvonal sorszáma | L_{NE} | \bar{u} | v_{avg} |
|---------------------|----------|-----------|-----------|
| 1 | 33 km | ~70 | 92 km/h |
| 2 | 107 km | ~200 | 97 km/h |
| 3 | 85 km | ~60 | 91 km/h |
| 4 | 87 km | ~150 | 60 km/h |
| 5 | 51 km | ~30 | 72 km/h |

Fontos megemlíteni, hogy \bar{u} értéke a jelenlegi, villamos-akkumulátoros motorvonatok alkalmazása előtti értékek alapján került kiszámításra, mely az új járművek üzembe helyezésének hatására végbemenő utazási színvonal növekedésnek köszönhetően várhatóan emelkedni fog.

Az esettanulmányban a vasútvonal villamosíttatása és az akkumulátor kapacitás kihasználása szempontot határoztuk meg legfontosabb szempontokként, míg az utasforgalom nagysága szempont kapta a legkisebb súlyszámot. A súlyszámok értékeit a 8. táblázat foglalja össze.

8. táblázat: Esettanulmányban használt súlyszámértékek

| Szemponthoz tartozó megnevezés | Súlyszám (s_i) |
|------------------------------------|--------------------|
| Vasútvonal villamosítottasága | 0,25 |
| Akkumulátor kapacitás kihasználása | 0,25 |
| Vasúti pályaállapotok | 0,2 |
| Méretgazdaságosság | 0,2 |
| Utasforgalom nagysága | 0,1 |

6. Eredmények

Az értékelő módszer alkalmazásának eredménye alapján megállapítottuk, hogy a Stadler Flirt Akku típusú motorvonat rendelkezik a legkedvezőbb tulajdonságokkal a vizsgált járművek körében, mivel az összes vizsgált viszonylaton ez a járműtípus érte el a legmagasabb pontszámot. A Bombardier Talent 3 és az Alstom Coradia Continental motorvonatok pedig a vizsgálat során egyszer érték el a Stadler Flirt Akku típusú motorvonattal holtversenyben a legjobb eredményt.

A vizsgált viszonylatok és vasútvonalak közül a Miskolc-Kazincbarcika-Ózd vasútvonal érte el a legmagasabb átlagpontszámot, 4,1 pontot. Ez a vasútvonal Miskolc és Kazincbarcika között villamosított, illetve megfelelő pályaállapotokkal is rendelkezik. Ezzel szemben a Debrecen-Püspökladány-Szeghalom-Gyoma-Békéscsaba viszonylat érte el a legalacsonyabb átlagos pontszámot, 2,9 pontot, ahol az útvonal középső 85 km-es szakasza nem villamosított és csak 60 km/h a legnagyobb megengedett átlagos pályasebesség. Az esettanulmány eredményeit a 9. táblázat összegzi.

9. táblázat: Az esettanulmány eredményei

| Vasútvonal sorszáma | Siemens Mireo Plus B | Bombardier Talent 3 | Stadler Flirt Akku | Alstom Coradia Continental |
|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|
| 1 | 4 | 4,15 | 4,15 | 4,15 |
| 2 | 3 | 3 | 3,5 | 3,25 |
| 3 | 2,5 | 2,9 | 3,4 | 3,15 |
| 4 | 2,3 | 3 | 3,5 | 3,25 |
| 5 | 2,85 | 3 | 3,75 | 3,4 |

Konklúzió

A cikkben egy multikritériumos értékelő módszert dolgoztunk ki, amely támogatja az újszerű hibrid, villamos-akkumulátoros vasúti járművek üzemeltetését és alkalmazhatóságát.

Az üzemeltetést legjobban befolyásoló szempontok a következők: a járművek akkumulátorainak kapacitása, a járművek befogadóképessége, a nem villamosított vasúti pályaszakaszok hossza, a töltési infrastruktúra jelenlegi kiépítettségi szintje, a vasúti pályák állapota, az üzemeltetni kívánt motorvonatok darabszáma, valamint az utasforgalom nagysága. A kutatás során az egyes szempontok alkalmazhatóságát az irodalomkutatás és a villamos-akkumulátoros motorvonatok már meglévő üzemeltetési tapasztalatai alapján értékeltük.

Az értékelő módszert magyarországi vasútvonalakra és különböző járműtípusokra alkalmaztuk. Az értékelés során megállapítottuk, hogy a Stadler Flirt Akku típusú motorvonat rendelkezik a legjobb tulajdonságokkal az értékelésbe bevont viszonylatok esetében, amely főként a hosszú, 150 km-es hatótávolságának és nagy férőhely kapacitásának tudható be. Az értékelt vasútvonalak eredménye alapján megállapítottuk, hogy azon vasútvonalakon célszerű a villamos-akkumulátoros motorvonatok közlekedtetése, melyek 40-60%-ban villamosítottak. Továbbá a jelentős utasforgalom is kedvező hatással van az üzemeltethetőségre, mert ez pozitívan befolyásolja a méretgazdaságossági szempontot.

A jövőben újabb szempontokat tervezünk bevonni az értékelésbe, mint például a károsanyag-kibocsátást és a villamos-akkumulátoros járművekre optimalizált menetrendi struktúrákat. Továbbá, az értékelő módszert alkalmazhatóságát jelentősen javíthatja az egyéb meghajtási módok bevonása az értékelésbe, mint például az üzemanyagcellás és dízel-akkumulátoros meghajtás.

Köszönetnyilvánítás: EFOP-3.6.3-VEKOP-16-2017-00001: Tehetséggondozás és kutatói utánpótlás fejlesztése autonóm járműirányítási technológiák területén - A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data#Rail_passenger_transport_performance_continued_to_increase_in_2019 (2021.03.12.)
- [2] Directorate-General for Research and Innovation: Electrification of the transport system, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017. <https://doi.org/10.2777/443147>
- [3] Skrucany T. – Kendra M. – Kalina T. – Jurkovic M. – Vojtek M. – Synak F.: Environmental Comparison of Different Transport Modes, *Nase More* 2018/65 192-196 <https://doi.org/10.17818/NM/2018/4SI.5>
- [4] Hoffrichter A. – Miller A.R. – Hillmansén S. – Roberts C.: Well-to-wheel analysis for electric, diesel and hydrogen traction for railways, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 2012/17 28-34 <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.002>
- [5] Kalghatgi G.: Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport? *Applied Energy* 2018/225 965-974 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.076>
- [6] Vicente P. – Sampaio A. – Reis E.: Factors influencing passenger loyalty towards public transport services: Does public transport providers' commitment to environmental sustainability matter? *Case Studies on Transport Policy* 2020/8 627-638 <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2020.02.004>
- [7] Hemmati R. – Saboori H.: Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016/65 11-23 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.029>
- [8] Robinson M.K. – Holmén B.A.: Hybrid-electric passenger car energy utilization and emissions: Relationships for real-world driving conditions that account for road grade, *Science of the Total Environment* 2020/738 139692 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139692>
- [9] Catalbas M. C. - Yildirim M. - Gulden A. - Kurum H.: Estimation of optimal locations for electric vehicle charging stations, *EEEIC / I&CPS Europe*, Milánó, 2017
- [10] Földes D. – Csiszár Cs.: Framework for Planning the Mobility Service based on Autonomous Vehicles, *SCSP*, Prága, 2018
- [11] Péter T. – Szauter F. – Rózsás Z. – Lakatos I.: Integrated application of network traffic and intelligent driver models in the test laboratory analysis of autonomous vehicles and electric vehicles, *Int. J. Heavy Vehicle Systems* 2020/27 227-245 <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2020.104422>
- [12] Meinert M. – Preneloup P. – Schmid S. – Palacin R.: Energy storage technologies and hybrid architectures for specific diesel-driven rail duty cycles: Design and system integration aspects, *Applied Energy* 2015/157 619-629 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.015>
- [13] Richter M. – Sarrazin A. – Kaucher C. - Winkler H.: Investigation and analysis of accumulators for the use of electrochemical storage in hybrid shunting locomotives, *Procedia CIRP* 2019/81 1010-1015 <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.243>
- [14] Cipek M. – Pavkovic D. – Kljaic Z. – Mlinaric T.J.: Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route, *Energy* 2019/173 1154-1171 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.144>
- [15] Hong Z. – Li Q. – Han Y. – Shang W. – Zhu Y. – Chen W.: An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive, *International Journal of Hydrogen Energy* 2018/43 3261-3272 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.117>
- [16] Deng K. – Peng H. – Dirkes S. – Gottschalk J. – Ünlübayir C. – Thul A. – Löwenstein L. – Pischinger S. – Hameyer K.: An adaptive PMP-based model predictive energy management strategy for fuel cell hybrid railway vehicles, *eTransportation* 2021/7 100094 <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100094>
- [17] Cheng S. – Zhao G. – Gao M. – Shi Y. – Huang M. – Yousefi N.: Optimal hybrid energy system for locomotive utilizing improved Locust Swarm optimizer, *Energy* 2021/218 119492 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119492>

- [18] Herwartz S. – Pagenkopf J. – Streuling C.: Sector coupling potential of wind-based hydrogen production and fuel cell train operation in regional rail transport in Berlin and Brandenburg, *Energy* 2021/In Press <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.242>
- [19] Piraino F. – Genovese M. – Fragiaco P.: Towards a new mobility concept for regional trains and hydrogen infrastructure, *Energy Conversion and Management* 2021/228 113650 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113650>
- [20] Mwambeleko J.J. – Kulworawanichpong T.: Battery electric multiple units to replace diesel commuter trains serving short and idle routes, *Journal of Energy Storage* 2017/11 7-15 <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.01.004>
- [21] Mwambeleko J.J. – Kulworawanichpong T.: Battery and accelerating-catenary hybrid system for light rail vehicles and trams, *IEEECON*, Pattaja, 2017
- [22] Fragiaco P. – Piraino F.: Fuel cell hybrid powertrains for use in Southern Italian railways, *Energy* 2019/44 27930-27946 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.005>
- [23] <https://www.stadlerrail.com/> (2021.04.25.)
- [24] <https://www.alstom.com/> (2021.04.25.)
- [25] <https://rail.bombardier.com/> (2021.04.25.)
- [26] <https://www.mobility.siemens.com/> (2021.04.25.)
- [27] Glickenstein H.: March 2019 Land Transportation News [Transportation Systems], *IEEE Vehicular Technology Magazine* 2019/14 18-26 <https://doi.org/10.1109/MVT.2018.2881856>
- [28] <https://mediarail.wordpress.com/battery-powered-train-projects-its-time-to-growth/> (2021.04.25.)
- [29] Masatsuki I.: Development of the battery charging system for the new hybrid train that combines feeder line and the storage battery, *IPEC*, Szapporo, 2010
- [30] Ghaviha N. – Campillo J. – Bohlin M. – Dahlquist E.: Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation, *Energy Procedia* 2017/105 4561-4568 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
- [31] Gao Y. – Jiang J. – Zhang C. – Zhang W. – Ma Z. – Jiang Y.: Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses, *Journal of Power Sources* 2017/356 103-114 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.04.084>
- [32] Lei Y. – Zhang C. – Gao Y. – Li T.: Charging Optimization of Lithium-ion Batteries Based on Capacity Degradation Speed and Energy Loss, *Energy Procedia* 2018/152 544-549 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.208>
- [33] Zhu J. – Knapp M. – Sorensen D.R. – Heere M. – Darma M.S.D. – Müller M. – Mereacre L. – Dai H. – Senyshyn A. – Wei X. – Ehrenberg H.: Investigation of capacity fade for 18650-type lithium-ion batteries cycled in different state of charge (SoC) ranges, *Journal of Power Sources* 2021/489 229422 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229422>